

EV 636 951 862 US

FEB 1 2006

Anordnung zur Drehmomentmessung von rotierenden Maschinenteilen

5

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Drehmomentmessung von rotierenden Maschinenteilen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

10

Bei Drehmomentaufnehmern auf der Basis von Dehnungsmessstreifentechnik werden die Dehnungsmessstreifen meist am Rotor appliziert und zu einer Wheatstone'schen Brücke verschaltet, die analoge Messsignale liefert, die dem Drehmoment proportional sind. Diese analogen Messsignale werden mittels einer Elektronik auf den Rotor verstärkt, meist in ein Frequenz- oder Digitalsignal umgesetzt und dann zum Stator induktiv übertragen und dort weiterverarbeitet. Die Umsetzung der analogen Messsignale vor der Übertragung zum Stator in Frequenz- oder Digitalsignale hat primär den Zweck, Fehlereinflüsse durch Amplitudenänderungen bei der Übertragung zu vermeiden.

15

Die Umsetzung der analogen Messsignale in frequenzmodulierte Signale ist die am häufigsten verbreitete Methode, da sie eine sehr einfache Auswertung mit digitalen Zählschaltungen erlaubt, die im Bereich der Automatisierungstechnik, insbesondere bei den drehzahlgeregelten Motorsteuerungen, üblich sind. Weiterhin fällt als parallele Messgröße die Drehzahl als Frequenzsignal an, so dass Drehmoment und Drehzahl mit gleichartigen Elektronikschaltungen erfasst und ausgewertet werden können. Da ein frequenzmoduliertes Drehmomentsignal nahezu eine unendliche Auflösung besitzt, und in hohen Signalbandbreiten ausführbar ist, hat es gegenüber einer Übertragung digital umgesetzter Signale erhebliche Vorteile in Bezug auf die Genauigkeit, die Messsignalauflösung und die Signalbandbreiten.

20

25

30

35

Des weiteren ist die Weiterverarbeitung der Digitalwerte in schnellen Motor-Regelkreisen nicht sehr verbreitet, da es kaum standardisierte Schnittstellen dafür gibt und die meisten Feldbusse zu langsam für diese Zwecke sind. Im übrigen ist eine Rückumsetzung in frequenzproportionale Signale zwar möglich, leidet aber an einer prinzipbedingten Nichtlinearität und daran, dass die Gruppenlaufzeiten der Messkette für Regelkreisanwendungen oft untragbar groß sind.

10 Aus der DE-PS 28 46 583 ist eine Vorrichtung zum Übertragen von Messsignalen über einen Übertrager von einer Rotor- auf eine Statorseite und zum Übertragen einer Versorgungsspannung über den gleichen Übertrager von der Stator- auf die Rotorseite bekannt. Der Übertrager besteht aus einer feststehenden, mit dem Stator verbundenen Wicklung und einer drehbaren, mit dem Rotor verbundenen Wicklung. Die beiden Wicklungen sind über einen Luftspalt induktiv gekoppelt. Die Versorgungsspannung für eine mit dem Rotor verbundene, einen Messwertaufnehmer enthaltende Schaltung wird dadurch erzeugt, dass die mit dem statorseitigen Oszillator erzeugte Wechselspannung über den Übertrager einem Rotorseitigen Gleichrichter mit nachgeschalteten Stabilisator zugeführt wird. Das Messsignal des Meßwertaufnehmers wird nach Verstärkung von einem Spannungs-Frequenz-Umformer in eine Impulsfolge umgesetzt, dessen Ausgangsstufe an die rotorseitige Wicklung des Übertragers angeschlossen ist. Von einem hochohmigen Punkt der Statorseite wird das Signal abgenommen und einem Demulator zugeführt. Des- sen Ausgangssignal entspricht dem des Spannungs-Frequenz-Umformers, d. h. eine niedrige Frequenz entspricht einem kleinen Messsignal und eine hohe Frequenz einem großen Messsignal. Derartige Spannungsfrequenzumsetzer stellen einen Funktionsgenerator mit steuerbarer Frequenz dar, die aus verschalteten Operationsverstärkern mit RC-Gliedern bestehen, die temperaturabhängige Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler sowie Langzeitdriften durch Alterung aufweisen. Insbesondere bei einer

15  
20  
25  
30  
35

Frequenzmodulation von Mittenfrequenzen über 100 kHz treten Störungen in Form von geringem zeitlichen Versatz im Empfänger auf, die als sogenannte Signal-Jitter Fehler im analogen Messsignal verursachen.

5

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, eine Anordnung zur Drehmomentmessung mit frequenzmodulierter Messsignalübertragung zu schaffen, deren Genauigkeit insbesondere bei höher übertragbaren Signalbandbreiten und hohen Modulationsfrequenzen verbessert und unempfindlich gegenüber temperaturbedingten Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehlern ist.

10

Diese Aufgabe wird durch die in Patentanspruch 1 angegebene Erfindung gelöst. Weiterbildungen und vorteilhafte Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

15

Die Erfindung hat den Vorteil, dass durch den Einsatz eines synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers eine hochgenaue langzeitstabile Frequenzumsetzung der analogen Messsignale möglich ist. Gleichzeitig wird durch eine Nachlaufsynchronisationsschaltung (PLL-Schaltung) der systemimmanente sogenannte Jitter-Effekt vermieden, der insbesondere die Messgenauigkeit kleiner Analogmesssignale erheblich beeinträchtigen würde. Deshalb sind vorteilhafterweise auch hohe Bandbreiten mit hoher Genauigkeit der Messsignale von der erfassten Rotorseite auf die Statorseite übertragbar.

20

25

Bei einer besonderen Ausführung der Erfindung mit einer hochfrequenten quarzgesteuerten Modulationsfrequenz ist vorteilhaft, dass damit die Übertragung von Störfrequenzen durch Filterschaltungen vermeidbar sind, die sonst im Bereich der übertragbaren Signalbandbreiten liegen würden und diese Messsignale verfälschen könnten.

30

35

Bei einer weiteren besonderen Ausführungsart ist vorgesehen, die quarzgesteuerte Modulationsfrequenz statorseitig zu erzeugen und synchronisiert zum Rotor zu übertragen, wodurch zusätzlich auch Störungen der Übertragerschaltungen vorteilhaft vermeidbar sind.

Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels, das in der Zeichnung dargestellt ist, näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1: eine schematische Darstellung einer Signalverarbeitungsschaltung zur Frequenzumsetzung, und  
Fig. 2: eine schematische Darstellung einer Signalverarbeitungsschaltung zur Frequenzumsetzung mit einem Frequenzteiler.

In Fig. 1 der Zeichnung ist eine schematische Signalverarbeitungsschaltung zur Erfassung und Übertragung frequenzmodulierter Messsignale von einem Rotor auf einen Stator dargestellt, die einen synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 mit einer nachfolgenden Nachlaufsynchronisation (PLL = Phase-Locked-Loops) 6 vor der Übertragerschaltung 9 aufweist.

Die Signalverarbeitungsschaltung 1 ist Teil einer Anordnung zur Drehmomentmessung von rotierenden Maschinenteilen, die zur Erfassung von Drehmomentsignalen an einem Rotor vorgesehen ist, in frequenzmodulierte Messsignale umgesetzt wird und diese induktiv und berührungslos auf einem Stator zur Messsignalauswertung übertragen werden. Dazu sind an einem Rotor Drehmomentaufnehmerelemente in Form von Dehnungsmessstreifen appliziert, die zu einer Wheatstone'schen Brücke verschaltet sind und Messsignale als analoge Drehmomentsignale erzeugen, die dem erfassten Drehmoment proportional sind. Diese analogen Messsignale am Ausgang der Drehmomentmessbrücke 2 werden in einer herkömmlichen Verstärkerschaltung 3 verstärkt und anschließend einem Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 zugeführt, der

die analogen Messsignale in eine stetig veränderbare Frequenz umsetzt. Bei herkömmlichen Spannungs-Frequenz-Umsetzern wird deren Zeitverhalten nur durch RC-Glieder bestimmt, die Linearitätsfehler aufweisen und temperaturabhängig sind und somit teilweise Nullpunkts- und Empfindlichkeitsfehler durch diese Frequenzumsetzung verursachen. Deshalb ist für die erfindungsgemäße Signalverarbeitungsschaltung 1 ein sogenannter synchroner Spannungs-Frequenz-Umsetzer (SFU) 4 vorgesehen, der statt der zeitbestimmenden RC-Glieder eine quarzstabilisierte konstante Eingangsfrequenz benötigt, die von einer quarzgesteuerten Generatorschaltung 5 geliefert wird. Diese quarzgesteuerte Generatorschaltung 5 erzeugt eine konstante Eingangsfrequenz in Form von Rechteckimpulsen mit einer Frequenz von beispielsweise 200 kHz. Das analoge Messsignal wird dabei durch ein Strom konstanter Ladungspulse kompensiert, die jeweils in Phase mit der angelegten Quarzfrequenz generiert werden. Dieser synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 liefert eine um ein bis zwei Zehnerpotenzen höhere Genauigkeit gegenüber herkömmlichen Frequenzumsetzern mit zeitbestimmenden RC-Gliedern. Dieser synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 ermöglicht somit den Bau von Rotorelektroniken als Signalverarbeitungsschaltungen 1 mit sehr hohen Genauigkeiten und Auflösungen.

Allerdings besitzen derartige synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 einen für Messsignalumsetzungen wesentlichen Nachteil, der ihre Verwendung im Grunde ungeeignet erscheinen lässt. Denn die erzeugten Ausgangspulse des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 werden nur zeitgleich mit einer positiven Halbwelle des Quarzsignals erzeugt, so dass die synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 ihre Ausgangsfrequenz nur in diskreten Frequenzschritten ändern können. Bei der vorgesehenen Quarzfrequenz von 200 kHz soll das analoge Messsignal vorzugsweise von -100% bis +100% frequenzproportional als 50 kHz bis 150 kHz (100 kHz  $\pm$  50 kHz) Frequenzsignal dargestellt werden. Wird nun beispielsweise ein analoges Eingangs-

signal von +40% angenommen, so entspricht dies einem Frequenzproportionalen Ausgangssignal des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 von 120 kHz. Da der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 nur zeitgleich mit einem Puls der angelegten Quarzfrequenz selbst einen Puls ausgeben kann, kann er nur ganzzahlig (n) teilbare Ausgangsfrequenzen ( $f_{SFU} = f_{Quarz}/n$ ) der Quarzfrequenz ( $f_{Quarz}$ ) erzeugen (in dem gegebenen Beispiel also  $200 : 1 = 200 \text{ kHz}$ ;  $200 : 2 = 100 \text{ kHz}$ ;  $200 : 3 = 66,6 \text{ kHz}$ ;  $200 : 4 = 50 \text{ kHz}$ ) und bietet somit nicht den gewünschten kontinuierlich durchstimmbaren Frequenzbereich von 50 kHz bis 150 kHz. Damit scheinen synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer auf den ersten Blick für den genannten Zweck als völlig ungeeignet. Eine Ausgangsfrequenz ( $f_{SFU}$ ) von 120 kHz kann nur durch eine fortlaufende Hin- und Herschaltung zwischen 200 kHz und 100 kHz als Mittelwert angenähert werden.

Die Wechselfrequenz mit der der Spannungs-Frequenz-Umsetzer zwischen den Frequenzen 100 kHz und 200 kHz umschaltet, um im Mittel 120 kHz zu erzeugen ist 40 kHz. Die vom synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer ausgegebene mittlere Frequenz von 120 kHz besitzt somit eine systembedingte Unruhe, die als sogenannten Jitter bezeichnet wird. Diese Frequenzunruhe führt zu einer starken Reduzierung der möglichen Messsignalauflösung, die für hochgenaue Drehmomentmessungen normalerweise nicht zulässig ist. Denn bei einem frequenzproportionalen Signalbereich von -100% bis +100% = 50 kHz bis 150 kHz entsprechen 200 kHz einem Analogsignal von +200% und 100 kHz entsprechen einem Analogsignal von 0%. Besonders kritisch wird dieser prinzipbedingte Jitter-Effekt in der Nähe von 0% Analogsignal, weil dann der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 längere Zeit konstant 100 kHz ausgibt und nur mit niedrigerer Wechselfrequenz auf seine benachbarten möglichen Frequenzen von 66,66 kHz bzw. 200 kHz springt.

Zur Unterdrückung dieses systembedingten Jitter-Effekts ist in der Signalverarbeitungsschaltung 1 am Ausgang des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 eine Nachlaufsynchronisationsschaltung 6 als PLL-Schaltung (Phase Locked Loop-Schaltung) vorgesehen. Dadurch wird der Vorteil der hohen Präzision der synchronen Spannungsfrequenzumsetzung genutzt und gleichzeitig der Einfluss des systembedingten Jitters weitgehend unterdrückt. Denn die PLL-Schaltung 6 vergleicht ihre Ausgangsfrequenz durch den Rückkopplungszweig 11 mit der Eingangsfrequenz und stellt sie auf den mittleren Wert der Eingangsfrequenz ein. Da die PLL-Schaltung 6 eine Tiefpaßcharakteristik besitzt, kann sie den schnellen Frequenzumschaltungen des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 nicht folgen und gibt am Ausgang eine beruhigte Mittelfrequenz von beispielsweise 120 kHz aus, die mit hoher Genauigkeit dem analogen Messsignal von 40% proportional ist.

Das jeweilige frequenzmodulierte Ausgangssignal wird nachfolgend einer bekannten rotorseitigen Übertragerschaltung 9 zugeführt, die induktiv mit einer Übertragerschaltung 12 am Stator gekoppelt ist und das frequenzmodulierte Messsignal berührungslos auf die Statorseite 13 überträgt. Auf der Statorseite 13 wird die Amplitude der übertragenen Signalfrequenz meist in Impulsformerschaltungen regeneriert und direkt nachfolgenden Auswerteschaltungen zur Verfügung gestellt oder einer Demodulationsschaltung zugeführt, die die Messfrequenz in ein analoges Messsignal umwandelt. Gleichzeitig wird über die Übertragerschaltung 12 von der Statorseite 13 in herkömmlicher Weise auch die Speiseenergie induktiv auf die Rotorseite 14 übertragen, mit der sowohl die Messbrückenschaltung 2, die Verstärkerschaltung 3, der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 und die Nachlaufsynchronisationsschaltung 6 gespeist werden.

Eine verbesserte Ausführung der Signalverarbeitungsschaltung 1 ist in Fig. 2 der Zeichnung dargestellt. Diese Signalverarbei-

tungsschaltung enthält ebenfalls eine Drehmomentmessbrückenschaltung 2, eine Verstärkerschaltung 3, einen synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 und eine Nachlaufsynchronisationsschaltung 6 wie nach Fig. 1 der Zeichnung. Allerdings ist  
 5 der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 mit einer höherfrequenten quarzgesteuerten Generatorschaltung 7 verbunden, die eine Quarzfrequenz im MHz-Bereich (z.B. 3,2 MHz) an den synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 liefert. Bei diesem Ausführungsbeispiel pendelt deshalb die Ausgangsfrequenz am  
 10 synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 durch das ganzzahlige Teilungsverhältnis zwischen 1,6 MHz (0% Analogsignal) und 3,2 MHz (200% Analogsignal), um eine mittlere Frequenz von 1,92 MHz zu erzeugen. Da die Quarzfrequenz der hochfrequenten Generatorschaltung 7 16 mal der Modulationsfrequenz von 200 kHz  
 15 nach Fig. 1 entspricht, erhöht sich auch die Wechselfrequenz am Ausgang des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 um den Faktor 16 und ergibt somit eine Wechselfrequenz von 640 kHz, die mit der dann auch 16-fach breitbandigeren nachfolgenden PLL-Schaltung 6 gemittelt und damit als frequenzproportionale Ausgangsfrequenz von 1,92 erhalten wird. Dabei wird der  
 20 Dynamikbereich der schnelleren PLL-Schaltung durch Aufschaltung entsprechend dimensionierter RC-Glieder 8 vorgegeben.

Im Anschluss an die schnelle PLL-Schaltung 6 ist eine Frequenzteilerschaltung 10 vorgesehen, die die beruhigte Ausgangsfrequenz im Verhältnis 16:1 herunterteilt, so dass dann bei einem vorgegebenen Analogsignal von 40% ebenfalls wieder ein frequenzmoduliertes Ausgangssignal von 120 kHz ausgegeben wird, das über die Übertragerschaltung 9 von der Rotorseite 14  
 30 induktiv auf die Statorseite 13 übertragbar ist. Da bei dieser Ausgestaltung die Frequenzumschaltung des synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzers 4 außerordentlich schnell erfolgt, liegen diese Frequenzen weit oberhalb der interessierenden Signalbandbreiten des Messsignals und können durch entsprechende Filterschaltungen unterdrückt werden, so dass dadurch  
 35



die Messsignalunruhe und somit auch die Messgenauigkeit nicht mehr beeinträchtigt werden kann.

Bei der Signalverarbeitungsschaltung 15 nach Fig. 2 der Zeich-  
5 nung mit den hochfrequenten Modulationsspannungen von über 3  
MHz sind auch Ausführungen möglich, bei der der synchrone  
Spannungs-Frequenz-Umsetzer 4 weiterhin rotorseitig 14 ange-  
ordnet wird, während die Nachlaufsynchroschaltung 6  
nach der Übertragerschaltung 12 auf der Statorseite 13 vorge-  
10 sehen ist. Dadurch sind vorteilhafterweise auch ungünstige zu-  
sätzliche Jitter-Störungen bei der Frequenzübertragung vom Ro-  
tor zum Stator weitgehend vermeidbar, wodurch sich die Messge-  
nauigkeit erhöht. Gleichfalls kann auch die frequenzstabili-  
sierte Trägerfrequenz statorseitig 13 erzeugt und über den  
15 Speiseleistungsübertrager der synchronen Spannungs-Frequenz-  
Umsetzerschaltung 4 zugeführt werden. Diese Trägerfrequenz  
kann dann gleichzeitig zur Synchronisation der statorseitigen  
Impulsformerstufen genutzt werden, wodurch ohne großen Aufwand  
eine jitterfreie d.h. messfehlerfreie Übertragung ermöglicht  
20 wird.

## 5 Patentansprüche

1. Anordnung zur Drehmomentmessung von rotierenden Maschinenteilen mit einer am Rotor angeordneten Dehnungsmessbrücke (2), dessen Ausgangssignale verstärkt und in einem Spannungs-Frequenz-Umsetzer (4) in ein frequenzproportionales Signal umgewandelt werden und mittels einer Übertragerschaltung (9) auf einen Stator übertragen werden, dadurch gekennzeichnet, dass der Spannungs-Frequenz-Umsetzer (4) als synchroner Spannungs-Frequenz-Umsetzer ausgebildet ist, dem zur Unterdrückung des sogenannten Frequenz-Jitters eine Nachlaufsynchronisationsschaltung (PLL) (6) nachgeschaltet ist.
2. Anordnung zur Drehmomentmessung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer (4) mit einer hohen quarzgesteuerten Frequenz betrieben wird, die ein Vielfaches der notwendigen Trägerfrequenz aufweist, die bei einer vorgegebenen Signalbandbreite vorgesehen ist, wobei der Nachlaufsynchronisationsschaltung (PLL) (6) eine Frequenzteilerschaltung (10) folgt, die die Ausgangsfrequenz um das Vielfache herunterteilt.
3. Anordnung zur Drehmomentmessung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der synchrone Spannungs-Frequenz-Umsetzer (4) rotorseitig (14) angeordnet ist, während die Nachlaufsynchronisationsschaltung (PLL) (6) auf der Statorseite (13) vorgesehen ist, wobei die Quarzfrequenz statorseitig (13) erzeugt und induktiv mit Hilfe der Ü-

bertragerschaltung (12) synchronisiert auf die Rotorseite (14) übertragen und dem synchronen Spannungs-Frequenz-Umsetzer (4) zugeführt wird.

USPS EXPRESS MAIL  
EV 636 851 862 US  
FEB 1 2006